

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO SIMULADO COM AS FERRAMENTAS PVSYST E SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)

João Frederico Souza de Paula – joaofredericosp@gmail.com
Geicyane Pinheiro de Lima – geycianedelima@gmail.com
Guilherme Cerbato Schmitt Prym – guilhermeprym@gmail.com
João Lucas de Souza Silva – jlucas.souzasilva@gmail.com
Karen Barbosa de Melo – karen.bmelo@gmail.com
Tárcio André dos Santos Barros – tarcio@fem.unicamp.br
Marcelo Gradella Villalva – villalva@unicamp.br

LESF – Laboratório de Energia e Sistemas Fotovoltaicos – FEEC/UNICAMP

4. Conversão fotovoltaica

Resumo. Para garantir a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, a previsão de geração de energia é essencial, sendo feita com auxílio de softwares de simulação fotovoltaica. Dessa forma, são necessários softwares eficientes, com confiabilidade garantida em termos de estimativa de geração de energia. Dentre os softwares mais populares, o System Advisor Model (SAM) é um dos poucos softwares gratuitos. Assim, o presente trabalho propõe simular um sistema fotovoltaico no software SAM e comparar com o software PVsyst, sendo considerado uma solução referência no mercado. Para isso, foi utilizada uma instalação fotovoltaica com uma potência instalada de 336,96 kWp no Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP como referência. Este sistema foi implementado a partir da iniciativa do programa Campus Sustentável, o qual possui o objetivo de realizar estudos sobre eficiência energética e inovação na universidade. Ao todo, foram realizadas três simulações, sendo duas com software distintos, com o banco de dados do Meteororm, e a terceira foi feita com o SAM, com o NSRDB. Os resultados das simulações foram comparados com os valores reais de geração mensal do sistema fotovoltaico, ao longo de doze meses. As comparações tiveram o objetivo de identificar qual o software é o mais otimista e o mais conservador, a precisão dos softwares em relação aos dados da geração real e dos valores de referência na literatura. Conforme os resultados obtidos, a simulação mais conservadora foi o SAM com os dados meteorológicos do Meteororm e a mais otimista também foi com o SAM, mas com os dados do NSRDB. Com relação ao erro percentual médio anual, o PVsyst obteve +6,36% de erro, o SAM com o Meteororm obteve +11,18% e o SAM com o NSRDB, -1,21%. Dessa forma, somente a segunda simulação ficou acima de $\pm 10\%$, limite proposto pela literatura, enquanto as outras mostraram resultados mais próximos da geração real.

Palavras-chave: Software Fotovoltaico, System Advisor Model, Simulação Fotovoltaica

1. INTRODUÇÃO

O setor de energia solar fotovoltaica (FV) cresceu de forma demasiada ao longo dos últimos anos, principalmente no Brasil, como consequência dos subsídios, tendo como início a inserção da regulamentação normativa 482/2012, em dezembro de 2012, permitindo a injeção de energia na rede elétrica das concessionárias de distribuição de energia elétrica do país em forma de paralelismo (Alves, 2019). Além disso, diminui a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), diversifica a matriz energética e traz benefícios econômicos (Cabello, 2013; Nascimento, 2015).

Com isso, para a realização de dimensionamento do projeto FV, é preciso levar em consideração diversos fatores, como: perdas ôhmicas, sombreamento do local, angulação dos módulos FV, posicionamento em relação a trajetória solar, posicionamento geográfico, perdas por temperatura e diversos outros fatores da parte elétrica e intervenções climáticas, as quais estas são as mais difíceis de serem previstas sem o auxílio de um banco de dados meteorológicos confiável (Oliveira, 2017).

Como existem diversos fatores a serem levados em consideração, o uso de *softwares* FV pode servir como auxílio para o dimensionamento do sistema FV, pois são capazes de considerar as situações citadas anteriormente. É importante que os *softwares* fotovoltaicos possuam boa precisão nos seus resultados, pois é necessário que exista uma ferramenta dessa área que possa realizar uma previsão de geração de energia mais próximo do real produzido pela instalação. Outro fator que influencia no desempenho destes *softwares* é a qualidade do banco de dados meteorológicos e dos modelos matemáticos utilizados (Rosa, 2014).

Alguns dos *softwares* usados como ferramentas de dimensionamento de sistemas FV são o System Advisor Model (SAM, 2021), PVsyst (PVsyst, 2021), PV*SOL (PV*SOL, 2021) e o Helioscope (Helioscope, 2021). Entretanto, exceto o SAM por ser um *software* gratuito, para ter acesso ao programa completo de todos os *softwares* citados é necessário

pagar anuidades ou um custo fixo para cada versão. Trabalhos como os de (Machado et al, 2020) e (Silva et al, 2020) já realizaram estudos sobre a comparação de desempenho de todos os *softwares* citados, com exceção do SAM, em torno da geração real de energia de sistemas FV existentes em algumas instalações da Universidade Estadual de Campinas, através do programa “Campus Sustentável”.

No trabalho de (Machado et al, 2020), foram realizadas três simulações com os *softwares* PVsyst, PV*Sol e Helioscope para a projeção de geração ao longo de um ano do sistema instalado na Escola de Extensão da UNICAMP (Extcamp), cuja capacidade era de 22,95 kWp. Este trabalho teve como objetivo realizar a análise dos resultados das simulações com valores reais de geração real do sistema, identificando o perfil de cálculo de cada *software* utilizado, sendo otimista ou conservador, e se a instalação FV estava dentro ou fora dos padrões projetados. É importante ressaltar que o tempo coletado de geração da instalação real foi de cinco meses, desde junho de 2019, enquanto as simulações foram de um ano, abrangendo o tempo de geração do sistema FV. Como resultados deste projeto, os três *softwares* obtiveram um erro percentual médio, ao longo de cinco meses de geração do sistema FV real, menor que 4%, em módulo. Além disso, o PV*SOL mostrou um resultado mais conservador, enquanto o Helioscope mostrou ser mais otimista nas projeções.

Para o trabalho de (Silva et al., 2020), os *softwares* utilizados foram o Homer, PV*SOL e o PVsyst os quais serviram para realizar simulações com o intuito de projetar a geração do sistema FV implantado no Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP (GMU), ao longo de doze meses, desde maio de 2019, cuja potência instalada é de 336,96 kWp. Além disso, foi realizada uma análise dos resultados entre os softwares em comparação com os cinco meses de geração do sistema real, pois foram os únicos meses de geração real possíveis de serem coletados. O objetivo deste trabalho foi o mesmo do (Machado et al., 2020), em relação às análises comparativas dos resultados das simulações com os dados gerados. Neste projeto, os resultados mostraram que o PV*SOL foi mais conservador e o HOMER mais otimista. Sobre o erro percentual, ao longo dos cinco meses de geração real, o PV*SOL foi o *software* que apresentou o maior valor médio com -10,38% de erro, enquanto os outros dois obtiveram erros médio inferior a 3%.

Como nos trabalhos anteriores de (Machado et al., 2020) e (Silva et al., 2020) trabalharam com os *softwares* já citados, e o trabalho de (Silva et al., 2020) usou como referência os cinco primeiros meses de geração da instalação FV no GMU, o presente trabalho usou como referência a geração de energia real do ginásio ao longo dos doze primeiros meses da geração da sua instalação e foi incrementado as simulações do *software* SAM.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre o *software* SAM e o PVsyst, por meio da comparação dos resultados das simulações com os valores reais de uma instalação FV, com o intuito de comparar a precisão dos *softwares* entre os resultados obtidos pelas simulações em relação à geração real do sistema instalado no GMU e verificar se estão dentro dos limites propostos pela literatura. Devido ao PVsyst ser um dos *softwares* mais conhecidos no ambiente acadêmico e comercial, foi o motivo da sua adoção como referência para o estudo. No caso do SAM, o *software* é gratuito, está disponibilizado no mercado (Silva, 2021) e não foi estudado em trabalhos anteriores, por isso que foi escolhido para o estudo deste artigo. As simulações têm como banco de dados meteorológicos os *softwares* Meteonorm e o *National Solar Radiation Database* (NSRDB).

Ao todo, foram realizadas três simulações para o desenvolvimento deste trabalho: i) do *software* PVsyst com o Meteonorm; ii) SAM com o Meteonorm; iii) SAM com o NSRDB. Foi utilizada como referência a planta FV instalada no telhado do Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP pelo programa “Campus Sustentável”, da Universidade Estadual de Campinas, cujo início de operação ocorreu em maio de 2019. A planta possui uma potência instalada de 336,96 kWp. Neste trabalho também são apresentados os dados de geração do sistema em funcionamento, servindo de comparação com os *softwares* para verificação do desempenho do sistema e da instalação FV.

2. SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

Os *softwares* SAM e PVsyst são utilizados no mercado para a realização de dimensionamento e simulação de projetos de sistemas de energia solar fotovoltaica (Silva, 2021). De acordo com as informações dos fabricantes e com o dimensionamento realizado no presente artigo, é apresentado um resumo descritivo dos dois *softwares* e, logo em seguida, a Tab. 1 destaca os recursos presentes em cada um deles.

2.1 System Advisor Model (SAM)

O System Advisor Model é um *software* desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (LNER ou NREL – Sigla do nome em inglês) (SAM, 2021). O programa possui algumas vantagens, como ser uma ferramenta gratuita; contém atualizações de módulos FV no mercado; é permitido que os projetos sejam modelados e simulados com diversos inversores com *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) ou otimizadores CC; simulações não anuais, apenas com um tempo pré-estabelecido pelo projetista; permite melhorar a modelagem de degradação da bateria em um sistema *off-grid*. Além disso, o SAM possui uma particularidade em que é um dos poucos *softwares* que realiza simulação de um *battery energy storage systems* (BESS).

Uma outra vantagem deste *software* é ter uma forte conexão com a linguagem de programação Python e seu ambiente, sendo bastante atrativo para quem programa nessa linguagem ou quem se interessa em aprender, pois é possível manusear e criar bases de dados, códigos, classes e bibliotecas em Python para serem usados no sistema do SAM, por meio do SAM SDK. Por outro lado, pode se tornar uma desvantagem, pois diminui a acessibilidade para

quem não sabe ou não tem interesse em programar. O banco de dados utilizado predominantemente por este *software* é o NSRDB (SAM, 2021).

2.2 PVsyst

O PVsyst é um *software* que permite realizar estudos, dimensionamento e análise de sistemas fotovoltaicos (Sharma, 2018). O projeto do seu sistema contém um procedimento rápido e simplificado: é possível especificar a potência desejada e a área disponível; determina módulos FV e inversores do banco de dados interno; o sistema permite também propor uma configuração matriz que conduza uma simulação preliminar. Para o caso do dimensionamento do sistema FV, o PVsyst conta com diagramas que mostram o comportamento da curva I x V da ligação em série dos módulos, juntamente com a faixa de MPPT, tensão, potência, limites de corrente do inversor e otimizadores.

Além disso, o programa exibe gráficos de distribuição anual da potência dos arranjos fotovoltaicos, pode realizar simulações com inversores de mais de uma entrada MPPT e análise de estudos de perdas como sombreamento, sobrecarga, temperatura, cabeamento e diversos outros que, dificilmente, são consideradas em projetos por meio de ferramentas como planilhas de cálculos feitos por usuários, os exibindo de forma objetiva e clara no relatório final.

O *software* proporciona uma visualização 3D da unidade consumidora com a visão do sistema FV instalado, possibilita a importação de arquivos de *softwares* de desenho técnico (AutoCAD, SketchUp, Helios3D, etc) e realiza simulação do movimento aparente do Sol ao longo do dia, projetando sombreamento de todos os objetos do desenho e verificando se há a presença de sombras nos arranjos FV. Os resultados das simulações são mostrados em um relatório, contendo informações como a análise de perdas do sistema, análise financeira, desempenho e a potência total gerada (Wh/ano) pelo sistema FV projetado. Um dos bancos de dados mais utilizados por este *software* é o Meteonorm (PVsyst, 2021).

Tabela 1. Comparação de recursos dos dois softwares.

OBJETO	DESCRIÇÃO	SOFTWARES	
		SAM	PVsyst
Simulações do sistema	Autônomo (off-grid)	•	•
	Conectado à rede (On-grid)	•	•
	Sistema de bombeamento		•
	BESS	•	
Parâmetros locais	Banco de dados meteorológicos	•	•
	Configuração de temperatura local	•	•
Construção física	Modelagem 3D	•	•
	Importar imagens de mapas	•	•
	Análise de sombreamento 3D	•	•
Timestep de Modelagem	Cálculo por mês	•	•
	Cálculo por hora	•	•
Formas de Montagem	Terra	•	•
	Telhado	•	•
	Telhado integrado	•	•
	Fachada integrada	•	•
	Seguidor solar	•	•
Financeiro	Previsão de payback	•	•
	Finanças diretas	•	•
	Empréstimo/Financiamento	•	•
Emissões evitadas	CO ₂		•
Compatibilidade de sistemas operacionais	Windows Vista, 7, 8 e 10	•	•
	MACOS	•	
	Linux	•	
	Windows virtual no Linux ou MACOS com VirtualBox	•	•
	Windows virtual no Linux ou MACOS com Parallels	•	•
	Windows virtual no Linux com VMware	•	•
	Simulação simultânea de projetos distintos	•	•

3. BANCOS DE DADOS METEOROLÓGICOS

Esta seção é referente a definição e identificação de vantagens e desvantagens das bases de dados Meteonorm e NSRDB, sendo estes os bancos de dados meteorológicos utilizados para a realização de simulações deste trabalho.

3.1 Meteonorm

O Meteonorm é um banco de dados meteorológicos utilizado como fonte confiável no mercado. Este banco de dados permite o acesso a séries históricas de radiação, temperatura, umidade, precipitação e vento (Meteonorm, 2021). Contém cinco satélites geoestacionários, possuindo uma abrangência espacial em todo o território nacional e como os seus dados também são disponibilizados a cada hora, sendo compatível com formato de dados de *softwares* como o PVsyst e SAM (Santos, 2020)

Outras características do Meteonorm é que seu banco de dados consiste também em mais de oito mil estações meteorológicas e uma climatologia aerossol calibrada globalmente. Assim, permite a realização de cálculos de interpolações sofisticadas, trazendo uma boa precisão para os seus dados. Além disso, o Meteonorm trata-se de um sistema aberto, possibilitando a importação de quaisquer dados de terceiros, tanto de satélites quanto de estações meteorológicas (Da Silva, 2018; Meteonorm, 2021).

3.2 National Solar Radiation Database

O *National Solar Radiation Database* é um banco de dados meteorológicos desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis, cujos dados são amostrados a cada 1 hora ou a cada 30 minutos e os três tipos de medições de radiação solar mais comuns são: horizontal global, irradiância horizontal direta normal e difusa (NREL, 2021). Prioritariamente, o NSRDB possui os dados meteorológicos dos Estados Unidos, porém possui de outros locais internacionais também.

Atualmente, o NSRDB é modelado usando medições multicanais de satélites geoestacionários. No caso das versões mais antigas do NSRDB, os dados eram modelados usando nuvem e informações meteorológicas provenientes de aeroportos. Para representar a radiação solar em climas regionais, com precisão, era preciso realizar um número de coletas de dados locais e escalas temporais e espaciais (NREL, 2021).

Em relação a compatibilidade, os dados do NSRDB são compatíveis com diversos modelos econômicos e desempenho de sistema, inclusive o *System Advisor Model*, *PVWatts* e *Renewable Energy Potential (reV) model*, todos produtos criados pelo LNER (NREL, 2021).

4. FIGURAS DE MÉRITO E ERRO PERCENTUAL PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As figuras, ou índices, de mérito são indicadores numéricos obtidos através de equações matemáticas e são amplamente utilizadas com a finalidade de comparar, avaliar e verificar a necessidade de otimização de sistemas diferentes em relação às suas configurações, tecnologias e localização geográfica (Almeida, 2012; Benedito, 2009; Otake, 2017). Além da previsão de desempenho, nos sistemas FV as figuras de mérito também são utilizadas para detectar problemas operacionais, validar modelos para estimar o desempenho ao longo da fase de projeto, estimar custos e garantir que o projeto FV seja entregue conforme os requisitos solicitados pelo contratante, obtendo uma estimativa de geração de energia mais precisa. Alguns trabalhos da literatura apresentam figuras de mérito para a energia FV no contexto técnico e financeiro (Almeida, 2012; Khenkin et al, 2018; Silva, 2019). Os índices de âmbito técnico são importantes para a obtenção de uma comparação de desempenho entre os sistemas FV analisados. As principais figuras de mérito utilizadas para as análises deste trabalho são: Produtividade Final (Y_f), Desempenho Global (*Performance Ratio* - P_r) e Energia Entregue (E_D). Estas figuras de mérito foram as mesmas adotadas por (Silva et al., 2020) no mesmo ginásio, porém com softwares diferentes, com exceção do PVsyst que é repetido neste trabalho.

O Y_f é determinado pela razão da quantidade de energia elétrica em corrente alternada injetada na rede elétrica (E_D), em *kWh*, e a potência nominal do sistema fotovoltaico, em *kWp* (Almeida, 2012). A Produtividade Final é uma figura de mérito a qual permite a comparação de sistemas fotovoltaicos de tamanhos distintos, sendo normalizada a produção de energia em relação à potência nominal. Além disso, ela é determinante para mensurar o intervalo de tempo necessário para que um sistema FV em condições ideais produza a quantidade de energia equivalente a um sistema exposto a condições de um ambiente não controlado, possibilitando a adoção de intervalos de tempo mensais ou anuais. A Eq. (1) apresenta a relação de Y_f .

$$Y_f = \frac{\text{Energia Entregue } (E_D)}{\text{Potência Instalada}} \quad (1)$$

O P_r é um valor adimensional e é um dos índices de mérito mais importantes, pois leva em consideração o efeito geral das perdas e falhas em um sistema FV, permitindo a comparação dos sistemas independentemente da localização geográfica, posicionamento do gerador FV e potência nominal, normalizando a produtividade em relação à radiação. Por isso, este índice é largamente considerado o fator de qualidade para comparar a eficiência de qualquer projeto FV (Almeida, 2012; Satsangi, 2018). A Eq. (2) mostra a relação:

$$P_r = \frac{E_D (kWh)}{E_D \text{ Nominal} (kWh)} \quad (2)$$

A Energia Entregue (E_D) é a terceira e última figura de mérito analisada neste trabalho. Ela já foi mostrada nas equações anteriores e consiste na energia gerada pelo sistema FV e injetada na rede elétrica durante um período específico. Um outro importante indicador para o estudo, neste caso no que se refere à precisão dos softwares em relação a energia gerada pelo sistema real instalado no ginásio, é o erro percentual (Machado et al., 2020). Na Eq. (3) é possível observar como é calculado o erro percentual:

$$\% \text{ Erro} = \frac{E_{DN} - E_D}{E_{DN}} * 100\% \quad (3)$$

Conforme observado na Eq. (3), o resultado do erro percentual não é um valor absoluto, neste caso, sendo possível encontrar valores percentuais positivos ou negativos. O termo E_{DN} refere-se ao valor da energia entregue gerada pelo sistema real, enquanto a variável E_D é definida como o valor da energia entregue projetada pela simulação dos *softwares* fotovoltaicos.

5. METODOLOGIA

A planta FV utilizada para o resultado é apresentada na Fig. 1. Os *softwares* escolhidos para simulação foram o SAM e o PVsyst. O SAM foi escolhido por ser gratuito, tornando-se acessível para a comunidade acadêmica para desenvolvimento de pesquisas e para o mercado comercial FV, apresentando também diversas opções para implementar no relatório final, como mostrar ao cliente um relatório mais personalizado e com informações mais relevantes conforme a necessidade da situação. O PVsyst é um dos *softwares* mais utilizados pelos projetistas de sistemas fotovoltaicos, motivo pelo qual foi escolhido para fazer o estudo comparativo com o SAM e a geração real da instalação FV do Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP.



Figura 1 - Visão superior do telhado do GMU com o sistema FV instalado.

A primeira parte do trabalho foi selecionar os *softwares* e tendo como referência dois bancos de dados solarimétricos: Meteonorm (Meteonorm, 2021) e NSRDB (NREL, 2021). É interessante abordar esses dois bancos de dados, pois o primeiro é uma das bases de dados mais utilizadas e precisas do mercado, disponível em ambos os *softwares* utilizados neste trabalho (Silva, 2018). No caso da segunda simulação no SAM, foi usado como base de dados meteorológicos o NSRDB, pois trata-se de um banco de dados bastante utilizado por este *software* FV e é interessante que seja realizado uma análise comparativa com as outras simulações a fim de identificar a sua influência no desempenho e margem de erro dos resultados projetados em comparação com os dados reais. A Tab. 2 mostra como os bancos de dados meteorológicos foram aplicados em cada *software* neste trabalho.

Tabela 2. Simulações realizadas no trabalho de acordo com o software e a base de dados utilizados.

Simulação	Software	Base de dados
1	PVsyst	Meteonorm 7.1
2	SAM	Meteonorm 7.1
3	SAM	NSRDB

Em seguida foi realizada a simulação da planta FV do GMU nos dois *softwares* do estudo. A Tab. 3 mostra o modelo e o número de módulos fotovoltaicos e inversores utilizados na instalação, resultando em um sistema FV de 336,96 kWp de potência instalada.

Tabela 3. Os modelos e quantidade de módulos FV e inversores utilizados na instalação do sistema FV.

OBJETO	QUANTIDADE	MODELO
Módulo Fotovoltaico	1248	Canadian CS6K-270P
Inversor	5	Ingecon Sun 55 TL PRO

Na terceira etapa foram coletados os dados reais mensais geradas pelo sistema da planta FV, com o intuito de analisar o desempenho e realizar a aplicação das figuras de mérito aos resultados medidos e provenientes das simulações feitas. A partir destas informações coletadas e analisadas, é possível confirmar se o sistema instalado está de fato gerando a energia prometida pelo projeto e, paralelamente, realizar a comparação dos *softwares* a partir das suas simulações, exaltando as características positivas e negativas dessas ferramentas. Os dados coletados são referentes ao intervalo de tempo entre o mês de maio de 2019 e o mês de abril de 2020, completando doze meses de dados reais mensais de forma ininterrupta, intervalo de tempo este ideal para uma análise completa de geração, pois o sistema foi exposto por todas as variações climáticas ao longo de um período equivalente a um ano.

Um parâmetro relevante para validar o estudo, conforme a literatura dedicada ao estudo de sistemas fotovoltaicos, é respeitar a margem de erro da simulação, sendo menor que $\pm 30\%$ ao mês e $\pm 10\%$ ao ano (Pigueiras, 2005). Uma forma de prevenção da qual os *softwares* adotam para evitar que as análises não ultrapassem o limite de erro estabelecido é a aplicação de elementos estocásticos, devido a possibilidade dos erros ocasionados por índices solarimétricos serem elevados. Com relação a quantidade de erro na simulação proveniente dos módulos FV e dos inversores é baixo, pois os modelos presentes na planta FV são delineados e os seus erros são previsíveis pela literatura.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos das simulações e os dados coletados de geração da planta FV, ao longo de 12 meses. A partir dos resultados, foram realizados a análise de figuras de mérito dos *softwares*, comparação entre os resultados simulados com os dados coletados da geração real e a análise da margem de erro de dados mensais e anuais.

A Tab. 4 expõe os resultados dos índices de mérito Y_f , P_r e E_D para o intervalo de um ano, desde maio de 2019 a abril de 2020. Conforme os valores encontrados nas figuras de mérito, o SAM, com os dados meteorológicos do NSRDB, exibiu um resultado mais otimista, pois conseguiu projetar uma energia maior que o sistema FV entregou a rede. Por outro lado, o mesmo *software*, mas com a base de dados do Meteonorm encontra-se em um cenário mais conservador dentre as três simulações, sendo vantajoso para o ambiente comercial. Isto se deve a esta simulação estimar um valor de energia total entregue a concessionária menor que o valor real. Assim, os integradores, normalmente, possuem uma preferência para adotar este cenário, pois dessa forma conseguem entregar uma energia real maior que a prometida.

Tabela 4. Resultados anuais das simulações dos softwares para o sistema FV, tendo como parâmetro os índices de mérito e com base nos dados meteorológicos do Meteonorm.

SOFTWARE	Y_f	P_r	E_D
PVsyst	1.427,94 kWh/kWp	82%	481,16 MWh
SAM - Meteonorm	1.353,88 kWh/kWp	79%	456,21 MWh
SAM - NSRDB	1.542,74 kWh/kWp	77%	519,84 MWh

A Tab. 5 mostra os dados mensais e totais coletados da planta FV instalada e os resultados das simulações dos *softwares* FV, juntamente com os valores de margem de erro dos valores projetados com a geração real de energia, ao longo de 12 meses de coleta. É importante ressaltar que se trata de uma comparação entre o PVsyst com o SAM, tendo como base de dados meteorológicos proveniente dos *softwares* Meteonorm e do NSRDB. É recomendável que a margem de erro entre os dados simulados com os reais seja aproximadamente zero. Caso a margem de erro resulte em um valor negativo, significa que o valor simulado é maior que o valor da energia gerada na determinada amostra mensal

ou anual. Por outro lado, caso seja um valor positivo, a projeção prevista pela simulação é menor que a energia gerada pela planta FV.

Tabela 5. Comparação dos dados reais dos 12 meses com os dados da simulação do PVsyst e do SAM em relação ao sistema FV instalado.

Meses	Real (MWh)	PVsyst (MWh)		SAM - Meteonorm (MWh)		SAM – NSRDB (MWh)	
		Estimativa (MWh)	Erro	Estimativa (MWh)	Erro	Estimativa (MWh)	Erro
Maio	32,98	34,7	-5,22 %	32,30	2,05%	39,12	-18,63%
Junho	33,59	31,28	6,88 %	28,97	13,74%	30,88	8,08%
Julho	35,74	35,87	-0,36 %	33,64	5,87%	39,44	-10,34%
Agosto	38,32	40,21	-4,93 %	37,84	1,27%	40,67	-6,14%
Setembro	41,76	40,41	3,23 %	37,93	9,16%	44,99	-7,73%
Outubro	52,67	42,98	18,40 %	41,37	21,46%	45,48	13,65%
Novembro	48,7	47,94	1,56 %	45,82	5,92%	53,65	-10,17%
Dezembro	49,47	45,05	8,93 %	43,35	12,38%	47,34	4,31%
Janeiro	48,62	42,6	12,38 %	41,27	15,12%	47,27	2,78%
Fevereiro	38,92	41,98	-7,86 %	40,21	-3,32%	37,75	2,99%
Março	50,83	41,26	18,83 %	38,53	24,19%	49,39	2,84%
Abril	42,02	36,88	12,23 %	34,97	16,77%	43,86	-4,38%
Total	513,62	481,16	6,32%	456,21	11,18%	519,84	-1,21%

A Fig. 2 mostra no gráfico os resultados mensais obtidos pela geração real do sistema FV instalado no ginásio e compara com os resultados mensais das três simulações feitas pelos *softwares* FV: uma pelo PVsyst com o banco de dados do Meteonorm e as outras duas simulações realizadas pelo SAM, uma com o mesmo banco de dados do PVsyst e outra com o NSRDB. No caso da Fig. 3, trata-se de um gráfico que compara os valores das margens de erro mensais das três simulações ao longo do período de estudo.

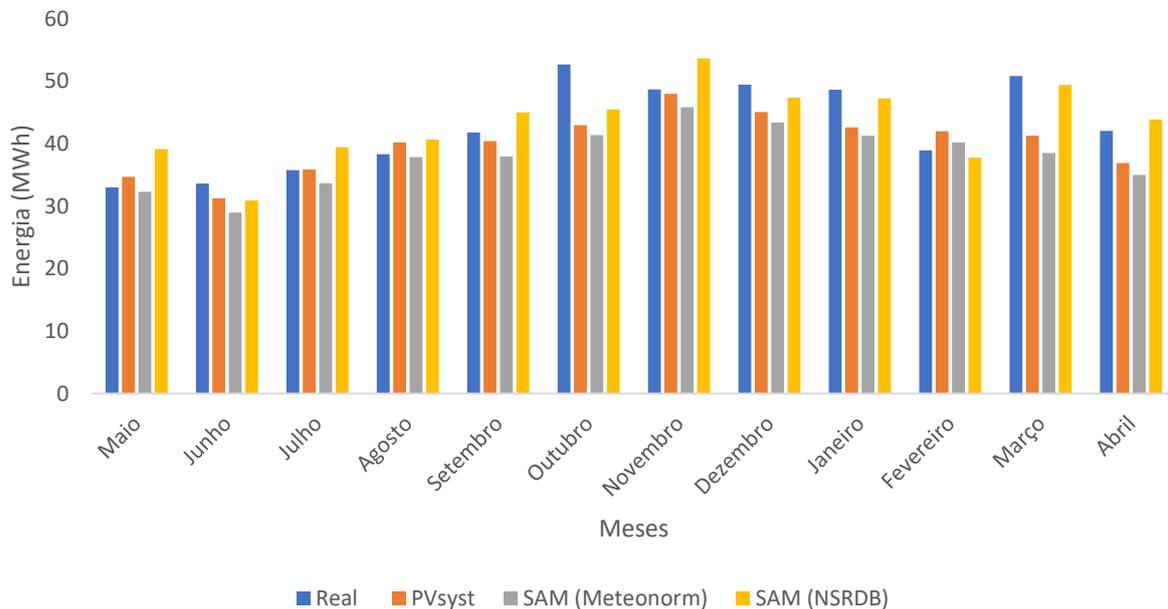


Figura 2 – Gráfico comparativo entre a geração real com o resultado das simulações.

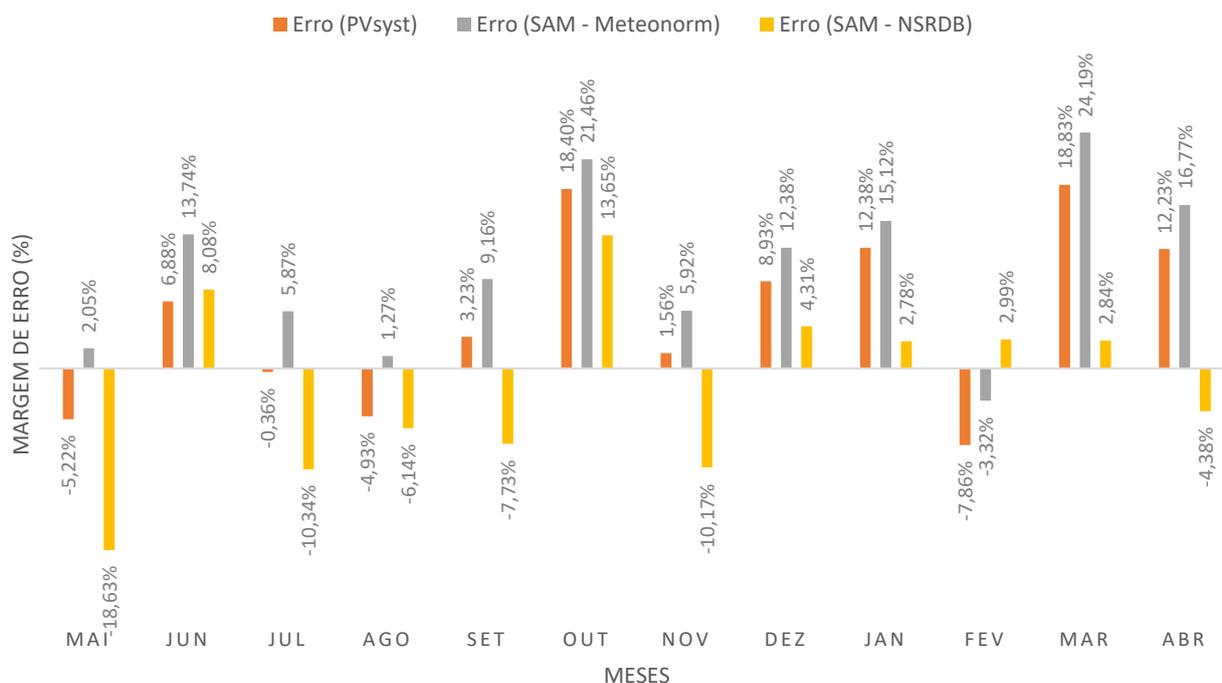


Figura 3 – Gráfico da margem de erro mensal das simulações.

Conforme observado na Tab. 3, é possível identificar que para as três simulações anuais, somente o erro percentual do SAM com a base de dados do Meteonorm ficou com o resultado acima de $\pm 10\%$, cujo valor foi de 11,18%, sendo o valor fora do limite recomendado por (Pigueiras, 2005). Entretanto, dentre todos os valores mensais de erro percentual resultantes das três simulações, nenhuma encontrou-se acima de $\pm 30\%$, conforme recomendado por (Pigueiras, 2005). Vale ressaltar que a simulação cujo menor erro percentual médio anual foi identificado com o *software* SAM, tendo como banco de dados o NSRDB, com o valor de -1,21%.

No caso das Fig. 2 e 3, pode ser observado que na maioria dos meses, os resultados da simulação do SAM com o NSRDB mostraram-se maiores do que os resultados coletados reais, justificando também o valor negativo do erro percentual médio anual. Contudo, as duas outras simulações obtiveram resultados menores, na média anual, em relação a geração real.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma análise comparativa de simulações para um sistema fotovoltaico instalado no Ginásio Multidisciplinar da UNICAMP, fazendo parte do projeto “Campus Sustentável na Universidade Estadual de Campinas”. Os *softwares* utilizados para esta análise foram o PVsyst e o *System Advisor Model*, pois o primeiro já foi utilizado em trabalhos anteriores como referência de estudos e o segundo por ser um software gratuito e disponibilizado para o uso no mercado.

Foram realizadas três simulações: Duas simulações foram referentes aos dois *softwares* com a mesma base meteorológica do Meteonorm e a terceira simulação através do *software* do SAM, com o banco de dados o NSRDB. O objetivo das simulações foi de validar o desempenho de geração do sistema FV instalado, além de verificar a precisão de cada *software* em torno da geração de um sistema real ao longo de um ano, realçar os pontos positivos e negativos de cada ferramenta e apresentar o desempenho de cada através de indicadores como figuras de méritos e erros percentuais.

O trabalho conseguiu ter o aproveitamento dos dados de geração real ao longo de um ano, resultando em uma energia entregue total de 513,62 MWh, possibilitando uma análise de ciclo completo com a alteração de níveis de radiação solar mensal. Conforme a análise dos resultados, dentre as três simulações, a simulação do SAM com a base de dados do Meteonorm foi o mais conservador, com a energia entregue de 456,21 MWh, enquanto a outra simulação com o SAM, mas com a base do NSRDB, foi o mais otimista, cuja energia entregue total projetada foi 519,84 MWh. Para a simulação do PVsyst, a energia entregue total simulada foi 481,16 MWh.

É comum ocorrer variações de precisão de *softwares* FV conforme o mês, local e instalação, mas mesmo com resultados distintos entre as simulações, todas obtiveram resultados dentro dos limites estabelecidos no quesito de erro percentual mensal, nenhum valor ultrapassando $\pm 30\%$, conforme a literatura. Entretanto, em relação ao erro percentual anual médio, somente o resultado do SAM com o Meteonorm ficou acima do limite de $\pm 10\%$, proposto pela literatura, com o valor de 11,18%. O menor erro percentual anual médio obtido foi com o SAM com NSRDB, obtendo um valor de -1,21%. Em relação ao PVsyst, o erro percentual alcançado foi de 6,32%.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio e suporte do programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico PD-00063-3032/2017 –PA3032: “Desenvolvimento de um modelo de Campus Sustentável na UNICAMP – Laboratório vivo de aplicações e minigeração renovável, eficiência energética, monitoramento e gestão do consumo de energia”, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL em parceria com a empresa CPFL Brasil. Os autores também agradecem ao CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. P., 2012. Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Dissertação de Mestrado, IE, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Alves, M. O. L., 2019. Energia Solar: Estudo da Geração de Energia Elétrica através dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Off-Grid, Trabalho de Conclusão de Curso, ICEA, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- Benedito, R. S., 2009. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório, IE, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cabello, A. F., Pompermayer, F. M., 2013. Energia fotovoltaica ligada à rede elétrica: atratividade para o consumidor final e possíveis impactos no sistema elétrico, IPEA.
- HelioScope features, 2021. Disponível em: <<https://www.helioscope.com/>>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- Khenkin, M. V. et al, 2018. Reconsidering figures of merit for performance and stability of perovskite photovoltaics, *Energy and Environmental Science*, vol. 9, n.1, pp. 739-743.
- Machado, G. M. V et al, 2020. Estudo de caso de um sistema fotovoltaico instalado no campus da unicamp em diferentes *softwares* de simulação, Anais, VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Melo, K. B., Souza, R. C. R., Villalva, M. G., 2020. Estudo Econômico Comparativo entre Sistemas Fotovoltaicos com Estrutura Fixa e com Seguidores Solares, Anais, VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Meteonorm, 2021. Disponível em: < <https://meteonorm.com/en/>>. Acesso em: 20 de nov. 2021.
- National Renewable Energy Laboratory – NREL. Disponível em: <<https://nrsdb.nrel.gov/>>. Acesso em: 11 de dez. 2021.
- Odake, F. T. K., 2017. Determinação de Índices de Mérito de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede e Instalado na COPEL, com Validação Através de Dados Meteorológicos, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPR, Paraná.
- Oliveira, L. G. M., 2017. Avaliação de fatores que influenciam na estimativa da geração e operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Pigueiras, E. L., 2005. Energy Collected and Delivered by PV Modules, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, pp. 905-970.
- PVSol overview, 2021. Disponível em: < <https://www.valentin-software.com/en/products/photovoltaics/55/pvsol>>. Acesso em: 15 nov. 2021.
- PVsyst features, 2021. Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/features/>>. Acesso em: 15 nov. 2021.
- Rosa, V. B., 2014. Aplicação Computacional para o Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Isolados, Trabalho de Conclusão do Curso, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Santos, H. F. L. et al., 2020. Que fonte de dados meteorológicos utilizar no Brasil? Que incerteza esperar? Uma comparação entre diferentes abordagens e variadas fontes de dado, Anais, VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Satsangi, K. P. et al, 2018. Performance Evaluation of Grid Interactive Photovoltaic System, 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, Uttar Pradesh, India, pp. 691-695.
- Sharma, S., Kurian, C. P., Paragond, L. S., 2018. Solar PV System Design Using PVsyst: A Case Study of na Academic Institute, 2018 ICCPCCT – International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies.
- Silva, J. A. A., 2019. Tratamento de Dados Meteorológicos e Análise de Desempenho do Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG, Dissertação de Mestrado, EMC, UFG, Goiás, Brasil.
- Silva, J. L. et al, 2020. A Comparative Performance of PV Power Simulation Software with an Installed PV Plant, 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), São Paulo, Brasil, pp. 531-535, doi: 10.1109/ICIT45562.2020.9067138.
- Silva, M. K. et al, 2018. Comparative Analysis of Transposition Models Applied to Photovoltaic Systems Using Meteonorm and NASA SSE Databases, 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brasil, pp. 237-241.
- Silva, M., Roberts, J. J., Prado, P. O., 2021. Calculation of the Shading Factors for Solar Modules with MATLAB, *Energies*, 3 de ago. 2021.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SIMULATION SOFTWARE BASED ON A PHOTOVOLTAIC SYSTEM INSTALLED AT UNICAMP: PVSYST AND SYSTEM ADVISOR MODEL

Abstract. *To ensure the economic viability of photovoltaic systems, the forecast of energy generation is essential, being done with the aid of photovoltaic simulation software. Hence, efficient software is needed, with guaranteed reliability in terms of energy generation estimation. Among the most popular software, the System Advisor Model (SAM) is one of the few free software. Thus, the present work proposes to simulate a photovoltaic system in the SAM software and compare it with the PVSyst software, being considered a reference solution in the market. For this, a photovoltaic installation with an installed power of 336.96 kWp in the Multidisciplinary Gymnasium of UNICAMP was used as a reference. This system was implemented from the initiative of the Sustainable Campus program, which aims to carry out studies on energy efficiency and innovation at the university. Altogether, three simulations were carried out, two with different software, with the Meteonorm database, and the third with the SAM, with the NSRDB. The simulation results were compared with the actual monthly generation values of the photovoltaic system, over twelve months of collected data. The comparisons aimed to identify which software is the most optimistic and the most conservative, the accuracy of the software in relation to real generation data and reference values in the literature. According to the results obtained, the simulation that proved to be the most conservative was the SAM with meteorological data from Meteonorm and the most optimistic was also with the SAM, but with data from the NSRDB. Regarding the average annual percentage error, PVSyst got +6.36% error, SAM with Meteonorm got +11.18% and SAM with NSRDB, -1.21%. Thus, only the second simulation was above $\pm 10\%$, the limit proposed by the literature, while the others showed results closer to the real generation.*

Key words: *Photovoltaic Software, System Advisor Model, Photovoltaic Simulation*